

## Complexo ígneo de Sintra – um modelo de instalação constrangido por novos dados de gravimetria e ASM

P. Terrinha<sup>(a,1)</sup>, A. Aranguren<sup>(b,2)</sup>, M. C. Kullberg<sup>(a,3)</sup>, E. Pueyo<sup>(c,4)</sup>, J. C. Kullberg<sup>(d,5)</sup>,  
A. M. Casas Sainz<sup>(e,6)</sup> & C. Rillo<sup>(f,7)</sup>

a - Departamento de Geologia / LATTEX, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, Ed. C2, 5º piso, 1749-016 Lisboa  
b - Departamento de Geodinámica, Universidad del País Vasco, Apdo. 644, 48080 Bilbao, España  
c - Paleomagnetic Laboratory, Inst. of Geophysics – University of Leoben, Gams 45, A-8130 Frohnleiten, Austria  
d - Centro de Investigação em Geociências Aplicadas / Universidade Nova de Lisboa, Quinta da Torre, Monte de Caparica, 2829-516 Caparica  
e - Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, España,  
f - Departamento de Física Teórica, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, España,  
1 - pedro.terrinha@igm.pt; 2 - goparira@lg.ehu.es; 3 - mcarlak@fc.ul.pt; 4 - pueyo@unileoben.ac.at;  
5 - jck@mail.fct.unl.pt; 6 - acasas@posta.unizar.es; 7 - crillo@posta.unizar.es

### RESUMO

**Palavras chave:** instalação de lacólitos; intrusão do maciço de Sintra; ASM; gravimetria; Cretácico superior.

Um estudo gravimétrico realizado recentemente, mostra que o maciço de Sintra é um lacólito, com espessura máxima preservada de rocha ígnea, na região central, de cerca de 1 km. Estudos de Análise da Susceptibilidade Magnética realizados na mesma ocasião em 56 sítios de amostragem no interior do maciço ígneo, põem em evidência, no que respeita à intrusão granítica, uma foliação magmática com orientação irregular e uma lineação magnética  $k_1$  com uma direcção dominante NNE-SSW, consistente com um modelo de intrusão definido por uma zona de alimentação magmática com orientação WNW-ESE, em conformidade com o alinhamento dos mínimos gravimétricos no mapa de anomalias de Bouguer construído. A intrusão gabro-sienítica carece de padrão geométrico de ASM, salvo no contacto com o granito, onde é paralela ao mesmo. O valor global da susceptibilidade magnética das rochas ígneas do maciço de Sintra varia significativamente entre as fácies gabróicas ( $K: 72080 \times 10^{-6}$  S.I.), que afloram na região mais a oeste do maciço, e as fácies sieníticas e graníticas envolventes ( $K: 39 \times 10^{-6}$  S.I.). A intrusão do lacólito de Sintra ocorreu no Cretácico superior e foi controlada por dois conjuntos de falhas: um, de orientação NNW-SSE/90°, profundo, controlando a ascensão magmática inicial através da litosfera mais profunda e apenas localmente rompendo a superfície e, outro, de orientação WNW-ESE, controlando a instalação final do maciço. Durante o Terciário (muito provavelmente o Miocénico) o maciço de Sintra foi exumado e atingiu a sua altitude actual, devido à formação de um cavalgamento, vergente para norte, com uma direcção E-W aproximada, observável no contacto norte das rochas ígneas do maciço de Sintra com as rochas do encaixante sedimentar. Estima-se em 2 km a movimentação total no plano de cavalgamento.

### Introdução

O complexo ígneo de Sintra instalou-se no Cretácico superior (82 a 75 Ma, aproximadamente) na Bacia Lusitânica (margem oeste ibérica). O *rifting* nesta margem começou no Triásico e a formação de crosta oceânica, propagando-se de sul para norte, ocorreu há  $132 \pm 1.9$  Ma (Valanginiano superior/Hauteriviano inferior) na Planície Abissal do Tejo, há 126 Ma (Barremiano inferior) na Planície Abissal da Ibéria e possivelmente há  $112 \pm 1.1$  Ma nos Bancos da Galiza (Pinheiro *et al.*, 1996; Whitmarsh & Miles, 1995). Embora tenha ocorrido actividade magmática na Bacia Lusitânica, durante o Mesozóico, o volume resultante de rochas ígneas é insignificante quando comparado com o das margens continentais vulcânicas.

Os maciços de Sintra, Sines e Monchique intruíram num lineamento NNW-SSE e possuem formas, dimensões e orientações semelhantes. São elípticos (aproximadamente  $15 \times 5$  km), com orientação E-W e intruem, respectivamente, a margem continental estirada, o bordo do rift continental e o soco varisco não estirado. O lineamento NNW-SSE está materializado na Bacia Lusitânica por uma densa rede de fracturas, a sul do maciço de Sintra e na margem sul portuguesa pela falha de Portimão (Terrinha *et al.*, 1999).

A margem oeste ibérica sofreu um levantamento tectónico a partir do Cretácico superior (Turoniano?) e durante o Paleogénico, evidenciado pelas fácies sedimentares e pela formação de discordâncias ante-Maestrichtiano, desde os Bancos da Galiza, a norte, até Sines, a sul (Mougenot, 1980-81).

O complexo ígneo de Sintra aflora no sector meridional da Bacia Lusitânica, encaixado numa sequência sedimentar marinha, continua desde o Oxfordiano médio ao Cenomaniano superior e rodeado por depósitos continentais descontínuos, de idade provável Oligocénico. A intrusão deformou as rochas Mesozóicas pré-existentes formando um sinclinal anelar. Os eventos de inversão tectónica que provocaram o levantamento e o encurtamento da Bacia Lusitânica também afectaram a região de Sintra: i) a cobertura sedimentar da intrusão foi erodida, como mostram os depósitos continentais que contêm clastos da cobertura sedimentar, na base e de rochas ígneas do maciço, no topo; ii) o sinclinal anelar foi encurtado e o seu flanco norte invertido e reactivado como cavalgamento. O início da exposição das rochas ígneas intrusivas e bem assim o encurtamento verificado na região não pode ser datado com precisão uma vez que os depósitos continentais são azóicos e não há afloramentos do Neogénico bem datado na vizinhança da intrusão. O cavalgamento de Sintra teve certamente actividade em duas fases: i) primeiramente, antes da formação dos depósitos continentais que contêm clastos das rochas ígneas do

complexo de Sintra, uma vez que estes depósitos estão muito menos deformados do que as rochas sedimentares do Cretácico, subjacentes e, ii) posteriormente, após a formação destes depósitos, provavelmente durante o episódio principal de inversão da Bacia Lusitânica, no Miocénico (Carvalho, 1994; Kullberg & Kullberg, 2000).

O complexo ígneo de Sintra é formado por dois maciços aproximadamente concêntricos e uma rede complexa de filões associados, de diferentes composições e orientações. O maciço exterior é granítico, tem uma idade aproximada de 82 Ma (Rock, 1982) e resultou de anatexia do soco varisco (Rock, 1982; Leal, 1991). O maciço interno é constituído por uma sequência de rochas resultante de cristalização fraccionada que incluem gabros ( $78.3 \pm 1.9$  Ma), dioritos e sienitos (78.3 to 76.1 Ma) (Storetvedt *et al.*, 1987).

A forma elíptica alongada, aproximadamente segundo E-W, dos três maciços ígneos da margem oeste ibérica, a localização sobre um lineamento rectilíneo NNW-SSE, a semelhança entre as idades radiométricas e o quimismo alcalino inspiraram diversos modelos para a sua instalação (Ribeiro *et al.*, 1979; Mougnot, 1980-81; Terrinha, 1998; Terrinha & Kullberg, 1998). No que concerne a origem do magma, as interpretações mais recentes basicamente concordam que o magma que produziu o maciço interno de Sintra se formou no manto, tendo ocorrido pouca contaminação crustal nas rochas não graníticas (Rock, 1982; Leal, 1991; Palacios *et al.*, 1995).

## Resultados da gravimetria e geometria do maciço de Sintra

Para a compilação do mapa gravimétrico de Sintra foram efectuadas cerca de 160 novas determinações usando um gravímetro Lacoste & Romberg, abrangendo uma área de cerca de 80 km<sup>2</sup>. O espaçamento entre estações varia de 0.5 a 1 km, no interior do complexo ígneo. Para calcular as anomalias de Bouguer, utilizou-se um valor médio para a densidade de 2650 kg.m<sup>-3</sup>. Como não foi considerada qualquer referência absoluta, as determinações da gravidade só podem ser consideradas relativas a uma origem localizada fora do maciço, a NW da área estudada. A amplitude do campo gravítico medido, em relação à referência de base, varia entre -15 mGal e +3 mGal, valores observados em estações localizadas a leste e a sudoeste (no interior da área estudada), respectivamente.

A densidade das rochas ígneas foi determinada a partir de 31 medições directas, realizadas com amostras colhidas durante a execução do levantamento gravimétrico. Varia entre 2466 kg.m<sup>-3</sup> (granito) e 2760 kg.m<sup>-3</sup> ( fácies gabroica), com uma média de 2570 kg.m<sup>-3</sup> para as amostras analisadas (2550 kg.m<sup>-3</sup> para as fácies graníticas, 2560 para o sienito e 2760 para as fácies gabroicas, em média). A densidade da rocha encaixante, os calcários do Jurássico, varia entre 2706 kg.m<sup>-3</sup> e 2979 kg.m<sup>-3</sup>, com um valor médio de 2793 kg.m<sup>-3</sup>.

A anomalia regional da margem atlântica ibérica consiste numa superfície regular com direcção NNW-SSE, inclinando para NE (Mezcua *et al.*, 1996), com um gradiente aproximado de 1.5 mGal.km<sup>-1</sup>, *i.e.* está condicionada pela orientação da margem continental e pelo seu estiramento progressivo para oeste. O mapa de anomalias de Bouguer mostra claramente esta anomalia regional, fora do limite aflorante do maciço de Sintra. No interior do maciço e também próximo do seu bordo norte, as linhas de contorno das anomalias de Bouguer estão deflectidas devido à densidade mais baixa das rochas graníticas e sieníticas em relação às rochas encaixantes, o que não se observa na região mais a sudoeste do maciço, onde a densidade das rochas de fácies gabroica é muito semelhante à das rochas encaixantes. No interior do maciço existem quatro mínimos alinhados sobre uma direcção WNW-ESE, com uma diferença de até 8 mGal, em relação à origem.

A análise gravimétrica do complexo de Sintra sugere, para o conjunto do maciço, uma geometria lacolítica cujos extremos não se prolongam significativamente para além dos limites aflorantes actuais (Fig. 1). A sua dimensão determinada para o segmento “on-shore” é de 10 x 6.5 km, o comprimento maior segundo E-W, com uma espessura média preservada do corpo ígneo que varia de 500 a 1000 m e um volume global de cerca de 70 km<sup>3</sup>. O alinhamento WNW-ESE dos mínimos gravimétricos evidencia uma zona de raiz planar com vários pontos de injeção magmática. Este alinhamento de condutas alimentadoras sugere um controlo por fracturas com esta orientação.

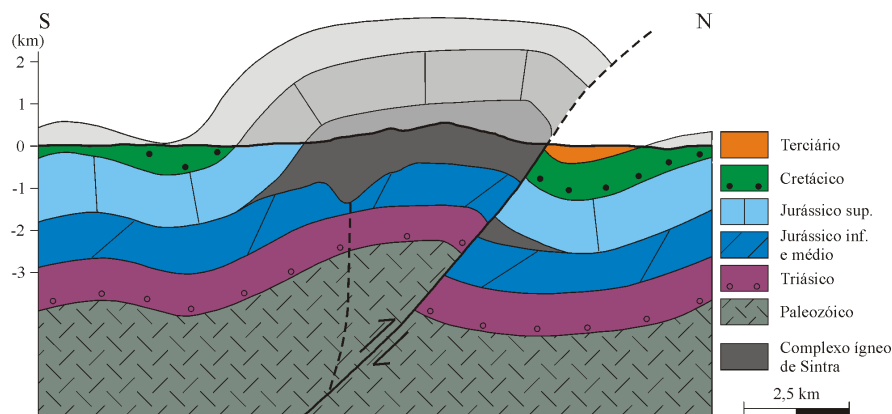


Figura 1 - Corte esquemático do maciço de Sintra. A ascensão magmática pode ter ocorrido ao longo de falhas distensivas da Bacia Lusitânica com orientação WNW-ESE, hoje obliteradas pelo maciço ígneo. Uma destas falhas actuou como rampa frontal de cavalgamento com vergência para norte, durante o inversão tectónica da bacia, no Terciário (Miocénico).

## Resultados da ASM

Para caracterizar a orientação preferencial dos minerais das rochas ígneas do complexo de Sintra, através da análise da susceptibilidade magnética (ASM), realizou-se uma campanha para recolha de amostras orientadas em 54 estações, homogeneamente distribuídas sobre a área aflorante do maciço.

No Departamento de Geologia da Universidade do País Basco - Euskal Herriko Unibertsitatea (Bilbao), foi medida a anisotropia magnética de 409 amostras padrão ( $10.4 \text{ cm}^3$ ), num campo de fraca intensidade usando um susceptímetro KLY-2 (Agico, Ltd). Mediram-se entre 3 a 11 amostras (média 7.6) por estação. Para distinguir a contribuição das susceptibilidades paramagnéticas e ferromagnéticas, fizeram-se determinações de histerese à temperatura ambiente, até 1 Tesla, usando um magnetómetro MPMS (Princeton Ltd.) no Instituto de Ciências dos Materiais de Aragão (ICMA, CSIC-Universidade de Zaragoza).

A orientação dos eixos individuais de susceptibilidade ( $K_{\max}$ ,  $K_{\text{int}}$  e  $K_{\min}$ ) foi ajustada usando a distribuição simétrica de C. Bingham (1974), em conformidade com o proposto por T. Román-Berdiel *et al.* (1995). A sua precisão é caracterizada pelo módulo do primeiro vector próprio (E1).

Os valores globais da susceptibilidade magnética observados no maciço de Sintra exibem uma grande variabilidade, estando contidos no intervalo  $3.9 \times 10^{-5}$  S.I. a  $7.2080 \times 10^{-2}$  S.I. Os ciclos de histerese determinados em amostras com o valor mais baixo, o mais elevado e um valor intermédio da susceptibilidade global (S40, K:  $39 \times 10^{-6}$  S.I.; S16, K:  $4762 \times 10^{-6}$  S.I. e S36, K:  $72080 \times 10^{-6}$  S.I.) evidenciam a presença de magnetite em todos os casos, com saturação completa a 0.2 Tesla.

As linhas de contorno para os valores globais da susceptibilidade magnética coincidem, grosseiramente, com o mapa geológico do maciço de Sintra. Os valores mais elevados de K aparecem no interior das fácies de gabro e sienito, nos sectores oeste e sudoeste da área estudada, enquanto os mais baixos valores de K correspondem às rochas graníticas, localizadas nos sectores nordeste e leste. O gradiente observado dos valores de K é superior ao detectado em outros granitos não magnéticos (Aranguren & Tubia, 1994; Gleizes *et al.*, 1993, etc.).

A correlação entre a susceptibilidade global (K) e o grau de anisotropia ( $P'$ ) em algumas estações, pode ser um indicador do possível efeito aleatório provocado pelos contribuintes ferromagnéticos e pode, também, reduzir a significância dos parâmetros de ASM calculados em estações com elevados valores de K.

Nas fácies graníticas do maciço de Sintra observa-se uma lineação magnética bem marcada orientada NNE-SSW. A inclinação das lineações é geralmente fraca, abaixo dos  $45^\circ$ . A foliação magnética mostra uma direcção geral E-W, excepto junto aos bordos onde a foliação magnética tende a ser paralela ao contacto com as rochas encaixantes. Próximo do bordo norte do maciço os planos da foliação inclinam para norte enquanto junto ao bordo sul inclinam para sul, definindo uma estrutura antiformal. A unidade gabro-sienítica exhibe uma distribuição concêntrica dos planos de foliação magnética. Os parâmetros vectoriais da ASM foram filtrados por forma a eliminar resultados espúrios.

No complexo ígneo de Sintra, o elipsóide magnético mostra um carácter oblato dominante, com as relações axiais mais significativas correspondentes às fácies de gabro e sienito (sector oeste). O grau de anisotropia  $P'$  é uma medida da excentricidade do elipsóide magnético (Jelinek, 1977). No maciço de Sintra,  $P'$  tem valores elevados no sector sudoeste e não se correlaciona claramente com os restantes parâmetros magnéticos (foliação ou forma, T).

## Conclusões

O complexo ígneo de Sintra, localizado na margem oeste ibérica, pode ser considerado um lacólito com dimensões aproximadas  $12 \times 8 \text{ km}$  e cerca de  $1 \text{ km}$  de espessura. A intrusão, constituída por um corpo externo granítico e outro, interno, gabro-sienítico, está localizada abaixo dos calcários do Jurássico superior. A intrusão magmática ocorreu durante o Cretácico superior, levantando e arqueando a sequência sedimentar sobrejacente (continua do Jurássico superior ao Cenomaniano superior). O estudo da ASM do lacólito de Sintra evidencia uma grande variabilidade da susceptibilidade magnética global, provavelmente dependente da variedade petrográfica, e uma origem magmática para a foliação e a lineação magnética observadas.

De acordo com os resultados da ASM o magma granítico intruiu através de condutas cuja localização corresponde aos mínimos gravimétricos, alinhadas segundo WNW-ESE, e fluiu horizontalmente segundo uma direcção perpendicular; a expansão horizontal do magma neste nível foi favorecida por uma descontinuidade litostratigráfica planar entre as unidades de calcários do Jurássico médio e superior.

Estes resultados sugerem que a ascensão do magma básico iniciada no manto ocorreu ao longo da falha Sintra-Sines-Monchique, profunda e descontínua com direcção NNW-SSE e que a forma dos corpos ígneos, intrusivos na crosta superior, está controlada pela intrusão do magma ao longo de falhas aproximadamente E-W, como foi proposto por P. Terrinha (1998) e P. Terrinha & M.C. Kullberg (1998) (Fig. 2). Assim, assume-se a existência de uma zona intermédia de descolamento entre estes dois níveis estruturais com anisotropias planares diferentes a controlar a ascensão magmática e a forma dos maciços intrusivos. As direcções WNW-ESE e E-W correspondem a fracturas pré-existentes na crosta superior da margem oeste ibérica, possivelmente resultantes da deformação tardi-varisca.

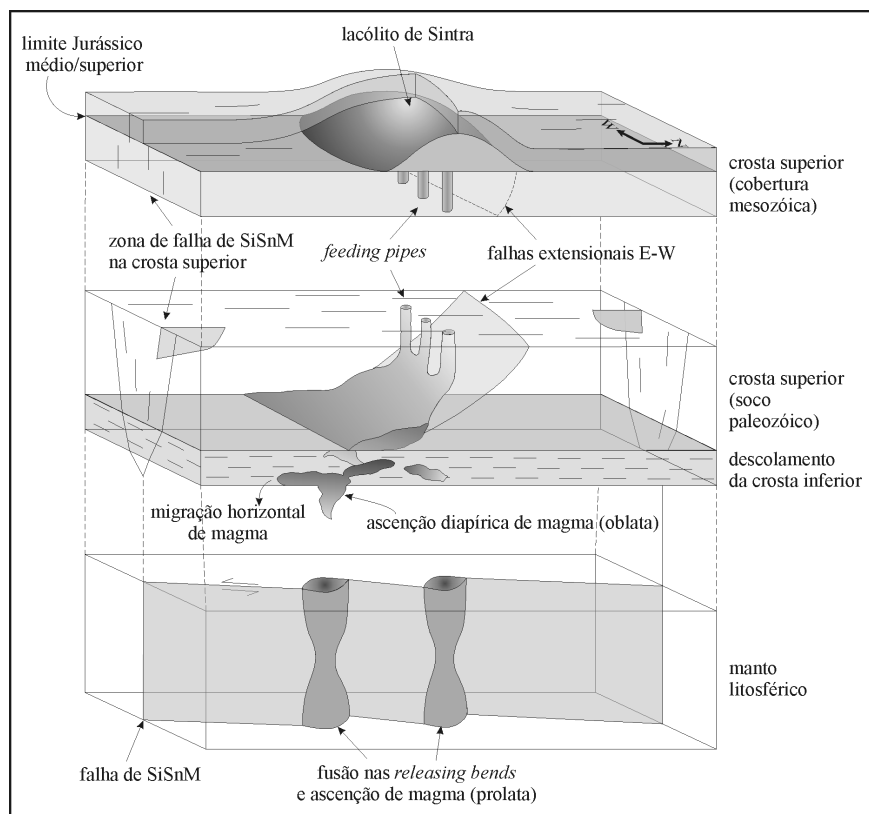


Figura 2 - Modelo de instalação para o complexo ígneo de Sintra. Três cortes esquemáticos na Litosfera mostram diferentes controlos estruturais possíveis para a ascensão magmática em diferentes níveis. A existência de uma falha profunda NNW-SSE é sugerida quer pela existência de pelo menos três maciços intrusivos sobre este alinhamento quer pela existência de diversos segmentos de falhas com esta orientação, no sector meridional da Bacia Lusitânica. A existência de uma falha E-W na crosta superior é deduzida a partir da forma elíptica dos maciços ígneos aflorantes e das anomalias gravimétricas e magnéticas observadas em Sintra. As três condutas magmáticas correspondem a três mínimos gravimétricos observados. A falha NNW-SSE teria sido reutilizada durante a instalação do corpo gabro-sienítico e dos filões mais tardios.

A inversão tectónica da Bacia Lusitânica no Terciário causou, por um lado, o dobramento ligeiro do lacólito de Sintra, como sugerem as inclinações em sentido oposto dos planos de foliação magnética junto aos bordos setentrional e meridional da intrusão e, por outro lado, o levantamento e consequente exumação do corpo ígneo, devido à activação do cavalgamento que materializa o bordo norte actual do maciço de Sintra. O deslocamento estimado ao longo deste cavalgamento é da ordem dos 2 km.

## Bibliografia

- Aranguren, A. & Tubia, J. M. (1994) - Características estructurales y modelo de emplazamiento del plutón de Guitiriz (Galicia), *Rev. Soc. Geol. España*, 7 (1-2), 63-73.
- Bingham, C. (1974) - An antipodally symmetric distribution on the sphere. *Ann. Statist.*, 2, 1201-1225.
- Carvalho, A. M. G. (1994) - O Cenozóico Continental a norte da Serra de Sintra (estudo tectono-sedimentar), *Museu Nac. Hist. Natural, Mem. Geociências*, 1, 89 p.
- Gleizes, G.; Nédélec, A.; Bouchez, J.-L.; Autran, A. & Rochette, P. (1993) - Magnetic susceptibility of the Mont Louis-Andorra ilmenite-type granite (Pyrenees): a new tool for the petrographic characterization and regional mapping of zoned granite plutons, *J. Geophys. Res.*, 98: 4317-4331.
- Jelinek, V. (1977) - The statistical theory of measuring anisotropy of magnetic susceptibility of rocks and its application, *Brno, Geofyzika*, 1-88.
- Kullberg, M. C. & Kullberg, J. C. (2000) - Tectónica da região de Sintra, In: Tectónica das regiões de Sintra e Arrábida, *Mus. Nac. Hist. Nat. Mem., Geociências*, 2, 1-38.
- Leal, N. (1991) - Caracterização geoquímica do Maciço Eruptivo de Sintra. Conjecturas de ordem petrogenética baseadas em dados geoquímicos, *Geociências, Rev. Univ. Aveiro*, 6(1-2), 33-40.
- Mezcua, J.; Gil, A. & Benarroch, R. (1996) - Estudio gravimétrico de la Península Ibérica y Baleares, *Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional*, Madrid, 2 mapas.
- Mougenot, D. (1980-81) - Une phase de compression au Crétacé terminal à l'Ouest du Portugal: quelques arguments, *Bol. Soc. Geol. Portugal*, XXII, 233-239.
- Palácios, T.; Alves, C. A. M.; Leal, N. & Munhá, J. (1995) - Mineralogia química do Maciço Eruptivo de Sintra, *Fac. Ciênc. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Porto, Mem.* 4, 775-779, (Resumo alargado).

- Pinheiro, L. M.; Wilson, R. C. L.; Reis, R. P.; Whitmarsh, R. B. & Ribeiro, A. (1996) - The Western Iberia Margin: A Geophysical and Geological Overview. *In*: R. B. Whitmarsh, D. S. Sawyer, A. Klaus and D. G. Masson (Eds.), *Proc. ODP, Sc. Results, College Station*, 149, 3-23.
- Ribeiro, A.; Antunes, M. T.; Ferreira, M. P.; Rocha, R.; Soares, A.; Zbyszewski, G.; Moitinho de Almeida, F.; Carvalho, D. & Monteiro, J. H. (1979) - Introduction à la Géologie Générale du Portugal, *Serv. Geol. Port.*, 114 p.
- Rock, N. M. S. (1982) - The Late Cretaceous alkaline igneous province in the Iberian Peninsula, and its tectonic significance, *Lithos*, 15, 111-131.
- Román-Berdiel, T.; Pueyo-Morer, E. L. & Casas-Sainz, A. M. (1995) - Granite emplacement during contemporary shortening and normal faulting: Structural and magnetic study of the Veiga massif (NW Spain), *Journal Structural Geology*, 17(12), 1689-1706.
- Storetvedt, K. M.; Mogstad, H.; Abranches, M. C.; Mitchell, J. G. & Serralheiro, A. (1987) - Paleomagnetism and isotopic data from Upper Cretaceous igneous rocks of W Portugal; geological correlation and plate tectonics aspects, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 88, 241-263.
- Terrinha, P. A. G. (1998) - Structural Geology and Tectonic Evolution of the Algarve Basin, South Portugal, *PhD Thesis, Imperial College, Univ. of London*, 430 p.
- Terrinha, P. & Kullberg, M. C. (1998) - An emplacement model for the Late Cretaceous igneous massifs of Sintra, Sines and Monchique, *Com. Inst. Geol. Min., Lisboa*, 84(1), D-53-D-56.
- Terrinha, P.; Dias, R. P.; Ribeiro, A. & Cabral, J. (1999) - The Portimão Fault, Algarve Basin, South Portugal, *Comun. Inst. Geol. e Mineiro*, 86, 107-120.
- Whitmarsh, R. B. & Miles, P. R. (1995) - Models of the development of the West Iberia rifted continental margin at 40°30'N deduced from surface and deep-tow magnetic anomalies, *Jour. Geophys. Res.*, 100, 3789-3806.